



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Bygningers lydforhold

en introduktion til bygningsakustikken

Olesen, Frits Bolonius

Publication date:
2002

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Olesen, F. B. (2002). *Bygningers lydforhold: en introduktion til bygningsakustikken*. Aalborg Universitet. U/ Bind U0203

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

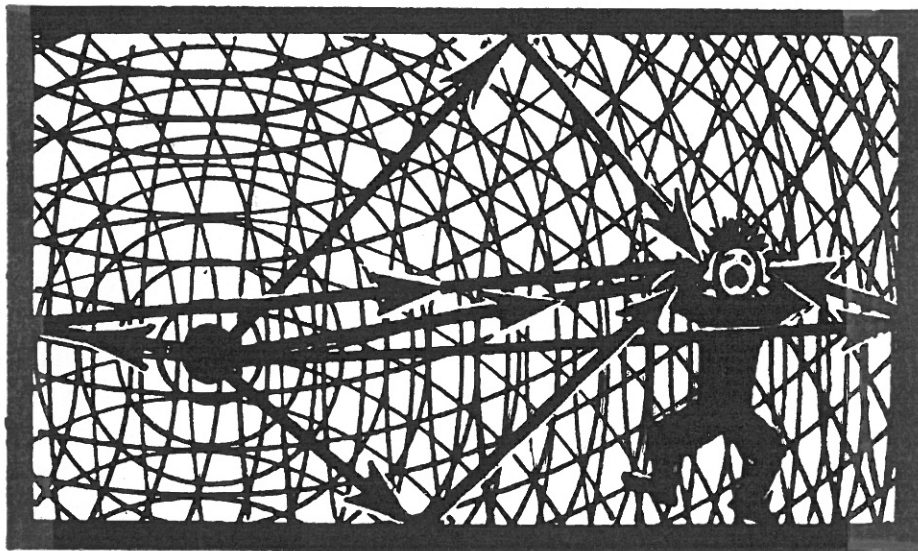
Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Frits Bolonius

Bygningers lydforhold

En introduktion til bygningsakustikken



Aalborg Universitet · Arkitektur & Design · Bygningsteknik

Forord

Dette kompendium er udarbejdet til brug ved undervisningen i Bygningskonstruktioner for arkitektur- og ingeniørstuderende ved Aalborg Universitet. I kompendiet gives en oversigtlig introduktion til det bygningsakustiske grundlag for design af bygningskonstruktioner, således som det bl.a. er formuleret i den danske byggelovgivning og de dertil knyttede danske og internationale standarder. Hensigten hermed er at præsentere de lydteoretiske og bygningsakustiske grundbegreber for de studerende på et relativt tidligt studietrin, således at de gennem studiet trænes i generelt at inddrage lydtekniske problemer i praktisk konstruktionsdesign, og at opsøge og anvende den hertil fornødne lydtekniske litteratur.

Af samme grund er der i kompendiet kun medtaget relativt få praktiske konstruktionseksempler, idet det netop er hensigten at tilskynde de studerende til at opsøge relevante eksempler i det righoldige erfaringsmateriale, der bl.a. er nedfældet i de foreliggende SBI-publikationer på området.

Aalborg, marts 2002

Frits Bolonius

Bygningers lydforhold

En introduktion til bygningsakustikken

**Aalborg Universitet · Arkitektur & Design · Bygningsteknik
Marts 2002**

Indhold

1. Bygningers lydforhold side 1

Bygningsakustikken (1), Lydklimaet (1), Støj og støjskader (1), Lydregulering (2), Lydisolation og lydabsorption (3), Massive konstruktioners lydisolation (5), Dobbeltkonstruktioners lydisolation (6), Samlingsdetaljer og flanketransmission (7), Lydmåling (8)

2. Rumakustik side 10

Efterklang (10), Frit, sfærisk lydfelt (10), Diffust lydfelt (11), Sammensatte lydfelter (13), Lydfelters opståen og hendøen (14), Efterklangstid (15)

3. Lydisolering side 19

Luftlydisolation, reduktionstal (19), Den vægtede luftlydisolation R'_w (22), Trinlydisolation (24)

Appendix

side 26

Oversigt over lydteoretiske og bygningsakustiske grundbegreber (26)

Supplerende litteratur

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT:

- * Rumakustik, SBI-anvisning 137, 1984
- * Bygningsakustik, teori og praksis, SBI-anvisning 166, 1989
- * Lydisolation i praksis, SBI-anvisning 167, 1989
- * Bygningers lydisolering, nyere bygninger, SBI-anvisning 172, 1992
- * Bygningers lydisolering, ældre bygninger, SBI-anvisning 173, 1992
- * Lydisolation i betonbyggeri, litteraturstudium, SBI-rapport 101, 1977

DANSK STANDARD:

- * DS/ISO 31/VII: Fysiske størrelser og måleenheder. Akustik. 2. udgave, 1984
- * DS/ISO 140: Akustik. Lydisolutionsmålinger i bygninger og af bygningselementer,
- * DS/ISO 2186: Akustik. Vurdering af lydisolation (1982):
 - Del 1: Luftlydisolation i bygninger og af bygningsdele
 - Del 2: Trinlydniveau
 - Del 3: Luftlydisolation af facader og dele af facader.
- * DS/ISO 3822: Akustik. Måling af efterklangstid, 1979.

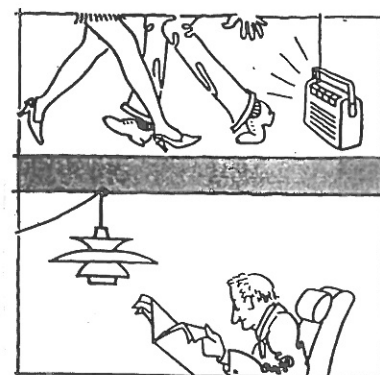
1. Bygningers lydforhold

BYGNINGSAKUSTIKKEN

Bygningsakustikken er den del af bygningsteknikken, der omhandler de krav til bygningers og bygningskonstruktioners lydtekniske egenskaber, som skal sikre, at der tilvejebringes forudsætninger for et tilfredsstillende lydklima, dvs tilfredsstillende lydmæssige - akustiske - forhold i bygningens rum. Bygningsakustikken (af græsk: akuein = at høre) omfatter to hovedområder:

- * Lydisoleringsteknikken og
- * Rumakustikken

I lydisoleringsteknikken behandles problemerne med at begrænse lydens udbredelse til og fra de enkelte rum i bygningen, medens rumakustikken handler om lydregulering og lyddæmpning, altså problemerne med at regulere lydforholdene inden for det enkelte rum. De to problemområder har således vidt forskelligt sigte, men er selvfølgelig ikke uden en vis sammenhæng.



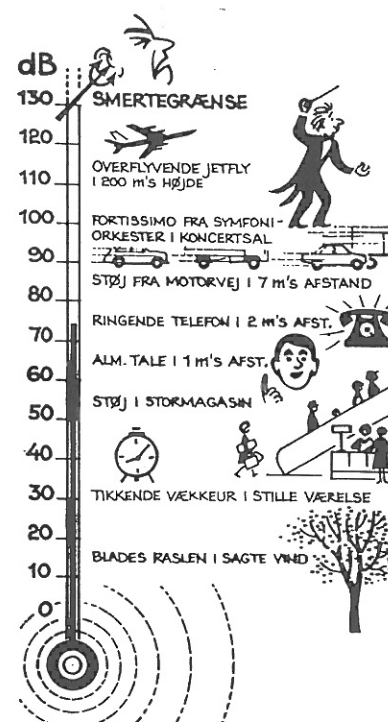
LYDKLIMAET

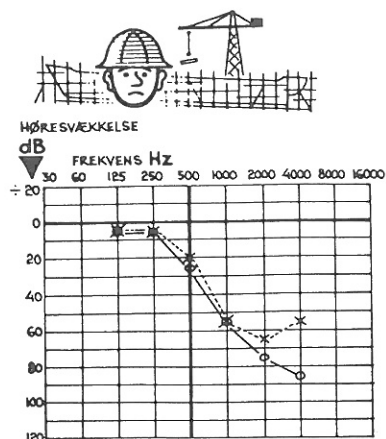
Hvad der forstås ved tilfredsstillende akustiske forhold, er naturligvis i høj grad et subjektivt spørgsmål. Det er velkendt, at menneskers følsomhed over for støj er uhyre forskellig, langt mere forskellig end følsomheden over for fx temperaturforholdene. Men også for det enkelte menneske er følsomheden over for lydforholdene overordentlig variabel, alt efter situationen. Befinder man sig fx i en bil eller en flyvemaskine, vil man meget hurtigt vænne sig til det meget betydelige støjniveau, medens det for de fleste mennesker vil være overordentlig generende, hvis man fra sit soveværelse kan høre en vandhanes dryppen. Opholder man sig i en kirke, vil man føle rummets akustik helt naturlig på dette sted, men man ville finde det utåleligt, hvis man havde en tilsvarende akustik i sit arbejdsværelse.

Disse omstændigheder gør det naturligvis vanskeligt at formulere kvantitativt, hvad man skal forstå ved tilfredsstillende akustiske forhold. Disse må karakteriseres ved to forhold, for det første ved støjniveauet, for det andet ved de egenskaber, der kan sammenfattes i begreberne lydfordeling, diffusitet og efterklang.

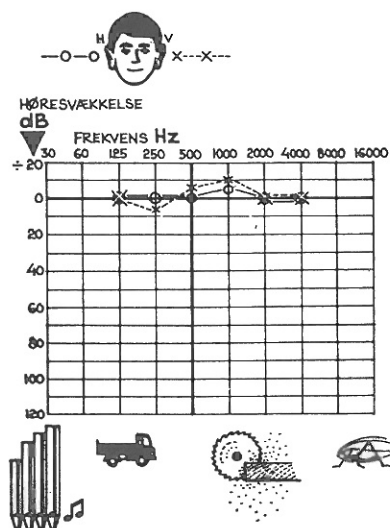
STØJ OG STØJSKADER

Hvad det første forhold, støjniveauet, angår, må man definere støj som





enhver lyd, der er uønsket i den givne situation. Hvorvidt støjen er generende, afhænger som nævnt i første række af det enkelte menneskes følsomhed (visse mennesker er - tilsyneladende - ufølsomme over for selv meget store støjpåvirkninger) og af den situation, hvori støjen forekommer. Men også forhold som støjens sammensætning, varighed, pludselighed og hyppighed er væsentlige i den forbindelse, ligesom helt psykiske forhold spiller en stor rolle (naboens børn støjer altid mere end ens egne børn!). Under alle omstændigheder vil støjen nedsætte vor koncentrationsevne - måske uden at vi selv bemærker det - og beslaglægge en del af vor psykiske kapacitet, således at vi får mindre overskud til at klare andre generende påvirkninger; vor tolerancetærskel nedsættes, og vi irriteres lettere.



Gennem talrige undersøgelser er det dokumenteret, at støj kan have overordentlig skadelig indflydelse på mennesker, enten som rent fysiologiske lidelser (akut eller kronisk støjtraume) eller som psykiske lidelser. De fysiologiske skader lader sig påvise gennem audiometriske målinger og kan derfor i princippet forebygges gennem passende foranstaltninger (støjdæmpning og høreværn), medens de psykiske skadevirkninger er af væsentlig mere subjektiv karakter og derfor langt vanskeligere at gardere sig imod. Ud fra et sundhedsmæssigt synspunkt kan der altså ikke herske tvivl om, at det er nødvendigt, at støjen reduceres så meget som muligt, mest naturligvis i boliger og arbejdslokaler.

En reduktion af støjniveauet til et "acceptabelt" niveau kan for det første ske ved at dæmpe den direkte støj, altså støj, der opstår i selve det omhandlede rum, for det andet ved at nedsætte den støj, der udefra trænger ind i rummet. Det første er et rumakustisk problem, det andet et lydisoleringsproblem.

LYDREGULERING

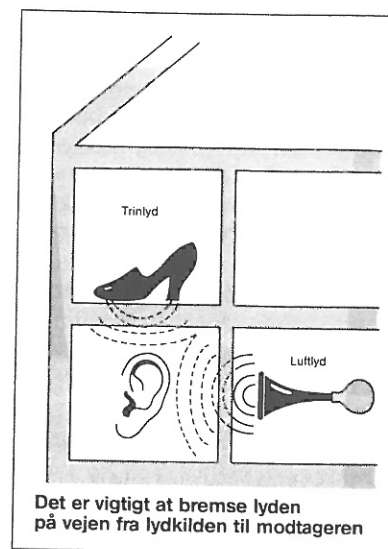
Det andet forhold, som karakteriserer et rums akustiske egenskaber, angår de vilkår, der hersker i rummet med hensyn til opfattelsen af lydtryk ("ønskede lyde" i modsætning til de førnævnte "uønskede", støj). Disse vilkår påvirkes gennem lydregulering, der har til formål at skabe en såkaldt "god akustik", altså gode høre- og lytteforhold, svarende til rummets formål, sang, tale, musik etc.

Gennem lydregulering tilvejebringes jævn lydfordeling, passende diffusitet (lydspredning) og en passende efterklang, karakteriseret ved rummets efterklangstid. De rumakustiske forhold i et rum afhænger i første række af rumoverfladernes beskaffenhed, men - for visse lokalers vedkommende - også i høj grad af rummets form. Disse problemer er altså så at sige interne (angår kun selve rummet) og har således intet med lydisoleringsteknikken at gøre - ud over naturligvis, at en forudsætning for, at man har nogen gavn af en god rumakustik, må være, at lydopfattelsen ikke forstyrres af støj udefra.

LYDISOLATION OG LYDABSORPTION

De to begreber, der anvendes til at karakterisere materialers og konstruktioners lydmæssige egenskaber, er lydisolation og lydabsorption.

En konstruktions lydisolerende evne er et udtryk for, hvor god konstruktionen er til at "spærre" for lyden - at hindre eller rettere begrænse lyd gennemgang (lydtransmission). Er der tale om luftlyd (air-borne sound) - fx fra menneskestemmer, musikinstrumenter eller højttalere - angives denne evne ved reduktionstallet, R. Reduktionstallet angives i dB (decibel) og er et udtryk en konstruktions (fx en væg) evne til at begrænse luftlydtransmissionen mellem to nabolokaler. Reduktionstallet (eller blot luftlydisolationen) måles som forskellen mellem støjniveauerne i de to rum og er iøvrigt i meget høj grad afhængig af lydens frekvens.



God luftlydisolation (dvs højt reduktionstal) kan opnås ved hensigtsmæssig konstruktionsudformning og valg af velegnede materialer:

- * tunge materialer
- * materialer med høj indre dæmpning (lille bøjningsstivhed)
- * tætte konstruktioner
- * dobbeltkonstruktioner

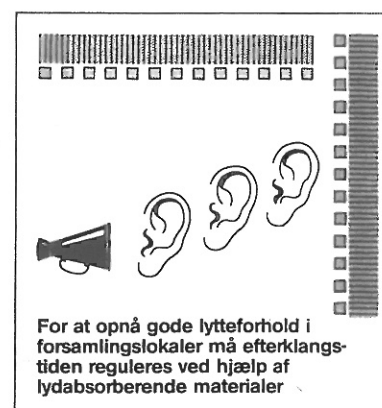
Ud over isolation mod luftlyd skal konstruktionerne have tilstrækkelig evne til at begrænse udbredelsen af bygningss lyd (impact sound), dvs lyd, der fremringes ved direkte mekanisk påvirkning af bygningsdelene, fx ved trinpåvirkning. Den måles ved det såkaldte trinlydniveau, der er et udtryk for, hvor højt et støjniveau der frembringes i et rum ved fx gang på etageadskillelsen ovenover.

God trinlydisolation (dvs lavt trinlydniveau) kan opnås ved:

- * tunge materialer
- * dobbeltkonstruktioner med elastiske mellemlæg
- * tæpper eller andre bløde gulvbelægninger

Læs mere om den nærmere definition af begreberne reduktionstal, luftlydisolation og trinlydniveau i fx. SBI-anvisning nr. 172: Bygningers lydisolering, nye bygninger, Statens Byggeforskningsinstitut, 1992.

Et materiales eller en konstruktionsoverflades lydabsorption er et udtryk for, i hvor høj grad lyden absorberes ("opsuges") af materialet eller fladen. Kun en vis del af den lydenergi, der rammer en flade, reflekteres (tilbagekastes); resten absorberes. Evnen til at absorbere lydenergien angives ved absorptionskoefficienten, der angiver, hvor stor en del af den indfaldende lydenergi der opsuges (transmitteres eller omdannes til varme). En totalt reflekterende flades absorptionskoefficient er således = 0 (ingen absorption), medens en totalt absorberende flades absorptionskoefficient er = 1 (ingen refleksion). I praksis ligger



materialers og konstruktioners absorptionskoefficienter naturligvis et sted mellem 0 og 1 (lavest for hårde materialer som fx beton, tegl og glas, og højest for bløde materialer som fx mineraluld) og er iøvrigt i meget høj grad afhængig af lydens frekvens.

Stor lydabsorption kan opnås ved materialer med stor porøsitet, men også ved at udforme konstruktioner med særlige svingningsegenskaber. Der skelnes således mellem følgende typer af absorbenter:

- * porøse absorbenter (porøse, luftgennemtrængelige materialer)
- * membranabsorbenter (konstruktioner af tynde, tætte plader)
- * resonansabsorbenter (konstruktioner af perforerede plader)

Porøse absorbenter er materialer som mineraluld, tekstiler etc., der er luftgennemtrængelige. Den lydabsorberende virkning er stærkt frekvensafhængig, og absorptionskoefficienten er almindeligvis stigende med frekvensen. Ved at montere materialet et stykke fra den faste bygningsdel kan der opnås en forbedring af absorptionsevnen også for de lavere frekvenser. Dette princip anvendes bl.a. ved nedhængte akustiklofter, der typisk monteres 20 - 30 cm under det faste loft. For de helt lave frekvenser (o. 100 Hz) er absorptionsevnen normalt ringe.

Membranabsorbenter består af en tæt plade, som er anbragt i en vis afstand fra fast væg eller loft. En membranabsorbent virker fysisk på den måde, at luftrummet bag pladen udgør et elastisk medium, som understøtter pladen som en "fjeder", således at plade og hulrum har en ganske bestemt egensvingningsfrekvens, der afhænger af det bagved liggende hulrums dybde. Er denne egenfrekvens sammenfaldende med den indfaldende lyds frekvens, absorberes en stor del energien. En membranabsorbent har derfor en høj absorption i en forholdsvis snæver del af det samlede frekvensområde og almindeligvis en lav absorption i den øvrige del, alt afhængig af selve pladematerialets porøsitet. Det bemærkes, at visse konstruktioner som fx pladeopbyggede vægkonstruktioner og trægulve på strøer i sig selv udgør membranabsorbenter.

Resonatorabsorbenter består almindeligvis af perforerede plader adskilt fra den faste bygningsdel. En resonatorabsorbent virker fysisk på den måde, at de små luftpropper i perforeringerne sættes i svingninger og har en egensvingningsfrekvens, der afhænger af deres geometri, altså pladernes tykkelse, perforeringsgraden og perforeringernes størrelse, samt af hulrummets dybde. Ligesom membranabsorbenter udviser resonatorabsorbenter derfor i udpræget grad et snævert frekvensspektrum. Dette kan udvides ganske betydeligt ved, at der bag pladen anbringes et materiale stor porøsitet (fx en tynd mineraluldplade), altså ved at kombinere de to principielt forskellige absorbenttyper.

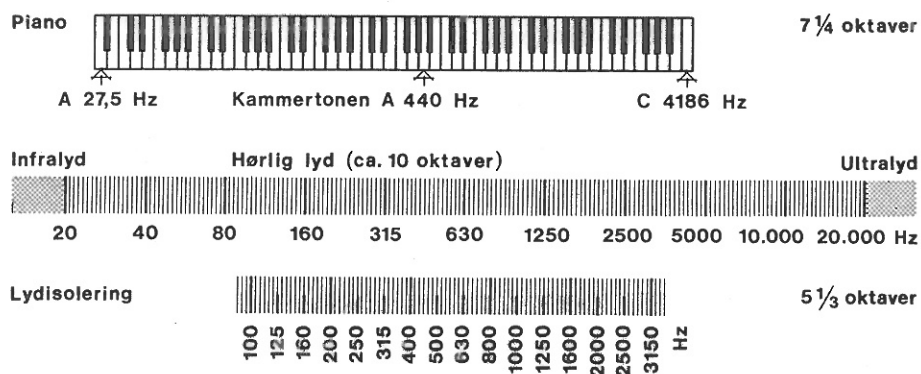
Læs mere om lydabsorbenter, materialers og konstruktioners absorptionskoefficienter, efterklangstid og andre rumakustiske grundbegreber i fx SBI-anvisning nr. 137: Rumakustik, Statens Byggeforskningsinstitut, 1984.

MASSIVE KONSTRUKTIONERS LYDISOLATION

For massive bygningskonstruktioner er det først og fremmest fladevægten (massen pr. arealenhed), der er afgørende for, hvor god lydisolationen er. Tunge materialer giver god lydisolation, fordi der bruges megen lydenergi til at sætte en stor masse i svingninger.

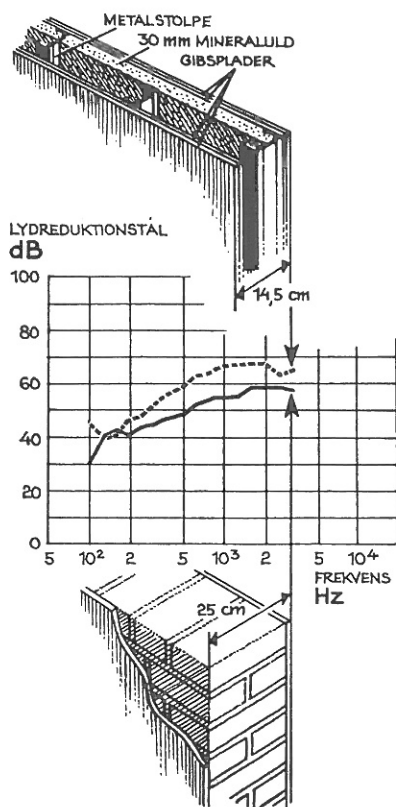
Massen er imidlertid ikke den eneste faktor; lydisolationen afhænger også i væsentlig grad af konstruktionens egne svingningsegenskaber og dermed af materialernes stivhedsegenskaber. En høj indre dæmpning i et materiale betyder, at der sker et stort energitab, når svingningerne udbreder sig gennem et materialelag. Når det fx er en udbredt opfattelse, at der er "lydt" i betonbyggerier, skyldes det, at udbredelsen i den homogene beton sker uden større energitab, hvorimod der fx i muret byggeri forekommer energitab, hver gang svingningerne skal forplantes fra sten til mørtel og omvendt.

Alle pladekonstruktioner (ikke blot tynde plader af fx gips, træbaserede materialer, stål og glas, men også massive konstruktioner af fx beton, letbeton og murværk) har en bestemt frekvens, den såkaldte koincidensgrænsefrekvens, hvor evnen til at spærre for lyden er svækket, fordi lydens frekvens falder sammen med (koinciderer med) grænsefrekvensen. For en konstruktions lydisolation er det derfor væsentligt, om denne grænsefrekvens ligger inden for det mest kritiske frekvensområde, dvs i området ca. 100 - 3.000 Hz, der er den del af det hør-



lige frekvensområde, som er det væsentligste med hensyn til lydisolation, og som internationalt er defineret som det område, hvor det er relevant at stille fx lovkrav til luftlyd- og bygningslydisolationen, jvf. ovenstående oversigt over frekvensområderne. Koincidenceffekten kan være et problem for visse massive konstruktioner, fx betonvægge og murede vægge i små tykkelser, men giver sjældent problemer ved tynde pladekonstruktioner af materialer med ringe stivhed, fx. gipsplader.

Endelig spiller konstruktionens tæthed en stor rolle. Lydtransmissionen gennem utætheder kan være langt større end lydtransmissionen gennem selve konstruktionsdelen; fx kan der transmitteres lige så megen lydenergi gennem et nøglehul som gennem en hel væg. Det er derfor en



forudsætning for at opnå en god lydisolations, at konstruktionerne - og navnlig konstruktionssamlingerne - som helhed lydtætte, dvs. lufttætte.

Læs mere om den praktiske udformning af enkeltkonstruktioners luftlydisolation og trinlydniveau i fx SBI-anvisning nr. 172: Bygningers lydisolering, nye bygninger, og i SBI-anvisning nr. 173: Bygningers lydisolering, ældre bygninger, Statens Byggeforskningsinstitut, 1992.

DOBBELTKONSTRUKTIONERS LYDISOLATION

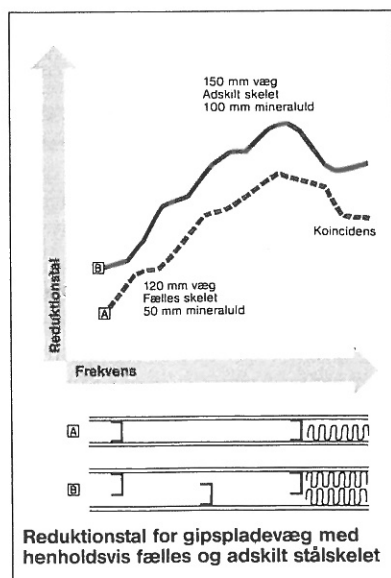
En massiv konstruktions lydisolerende evne forbedres, når massen øges. Fx stiger reduktionstallet med ca. 6 db, hver gang flademassen fordobles. Der er derfor i praksis ret snævre grænser for, hvor meget man ad den vej kan forbedre lydisolationsen.

En større lydisolationsen kan imidlertid også opnås på andre måder, nemlig ved i stedet at anvende dobbeltkonstruktioner bestående af to tætte konstruktioner adskilt af et lufthulrum. Generelt kan man ved at arbejde med lagdelte konstruktioner med forskellige materialeglag opnå en væsentlig større lydisolations end svarende til den samlede flademasse, idet der tabes energi, hver gang lyden passerer fra et materialeglag til et andet.

Tre faktorer er væsentlige for pladeopbyggede konstruktioners lydisolations (ud over pladernes fladevægt):

- * delkonstruktionernes uafhængighed (ingen mekanisk kobling)
- * afstanden mellem de to delkonstruktioner
- * lydabsorptionen i hulrummet

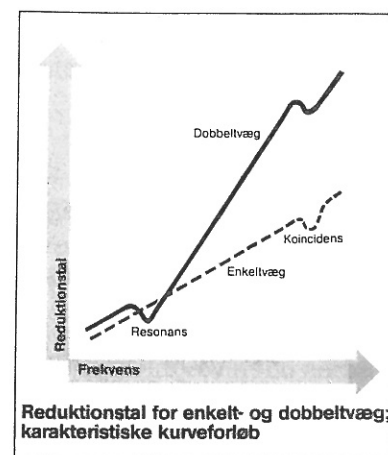
Den bedste lydisolations opnås ved at holde delkonstruktionerne fuldstændigt adskilte. Derfor giver pladebeklædte skeletvægge med separate skeletsystemer bedre lydisolations end tilsvarende pladebeklædninger monteret på et fælles skeletsystem.



Selv om den optimale løsning er to fuldstændigt uafhængige delkonstruktioner, opnås der også forbedringer, hvis pladebeklædningerne monteres på et fælles skeletsystem. Det er i denne forbindelse vigtigt, at de mekaniske forbindelser (lydbroerne) mellem de to halvdele minimeres. Den bedste løsning ville selvfølgelig være elastiske forbindelser (hvilket dog imidlertid sjældent er praktisk gennemførligt), men der kan også anvendes spinkle skeletkonstruktioner, hvor transmissionsarealet er lille. Fx giver stålskeletvægge en bedre lydisolations end tilsvarende træskeletvægge, idet det stive træskelet giver større mekanisk kobling mellem de to halvdele.

Ved dobbeltkonstruktioner spiller afstanden mellem de to tætte pladelag en stor rolle. Alle dobbeltkonstruktioner har en resonansfrekvens, ved hvilken luftlydreduktionen er meget lille, og som derfor bevirker en

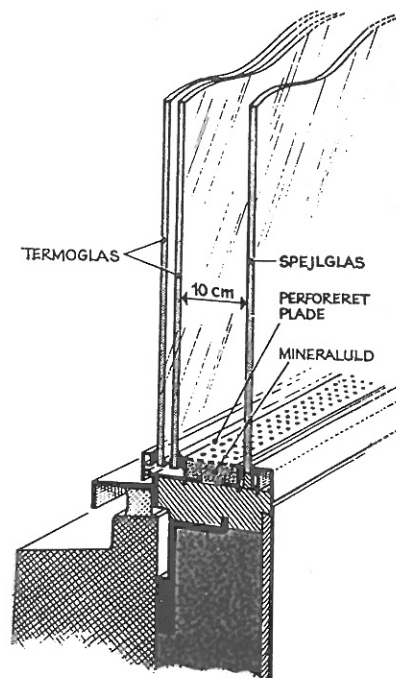
stor lydtransmission lokalt i dette område af frekvensspektret. Denne resonansfrekvens afhænger af såvel delkonstruktionernes flademasser som af afstanden mellem pladelagene. Jo større afstanden er, jo lavere er resonansfrekvensen. Ved udformning af dobbeltkonstruktioner er det derfor vigtigt af afpasse de enkelte delkonstruktioners flademasser og deres afstand på en sådan måde, at resonansfrekvensen falder uden for det kritiske frekvensområde (dvs ca. 100 - 3.000 Hz), hvilket i praksis vil sige under 100 Hz. Det betyder - alt afhængig af materialevalg og pladetykkelser - at afstanden mellem pladerne skal være af størrelsesordenen 10 - 15 cm. Er afstanden kun 1 - 2 cm som fx ved termoruder, kan resonansfrekvensen komme til at ligge i det kritiske område med deraf følgende forringelse af lydisolationen.



Med sådanne dobbeltkonstruktioner, som er opbygget af helt adskilte enkeltkonstruktioner, kan opnås en lydisolations, der langt overstiger lydisolationsen for en tilsvarende massiv konstruktion med samme flademasse. Men lydisolationsen kan forbedres yderligere ved at foretage dæmpning af hulrummet mellem pladerne dæmpes med lydabsorbende materiale, typisk mineraluld. Det er imidlertid vigtigt at være opmærksom på, at selvom mineraluld er et meget elastisk materiale, kan der - især med de meget tunge og stive mineraluldtyper - let dannes lydbroer mellem de to halvdele, såfremt mineralulden presses hårdt ind mellem pladerne.

Dette problem er især aktuelt ved gulvkonstruktioner, hvor mineralulden skal være stiv for at opnå trædefasthed. Med stive mineraluldtyper dæmpes trinlydstøj, medens forbedringen af luftlydisolationen ikke er væsentlig.

Dobbeltkonstruktionsprincippet anvendes under mange forskellige former til lydisoleringsformål. Det gælder såvel den mest udbredte anvendelse - indervægge - som nedhængte lofter, forsatsvægge foran eksisterende vægge, gulvkonstruktioner eller ydervægge. I næsten alle tilfælde er det største problem at opnå tilstrækkelig adskillelse mellem de to halvdele. Det er meget vigtigt, at en forsatsvægs skeletsystem ikke fastgøres til den eksisterende væg. Ligeledes vil et fritbærende underloft være lydisoleringsmæssigt bedre end et nedhængt loft.



SAMLINGSDETALJER OG FLANKETRANSMISSION

En godt lydisolerende bygningsdel er ikke i sig selv tilstrækkelig til at sikre, at der opnås god lydisolations. Også omgivelserne, dvs de tilstødende (flankerende) konstruktioner og ikke mindst samlingerne mellem dem, skal være af tilsvarende lydmæssig kvalitet. Det nytter således ikke meget at have en lydmeæssigt god rumadskillende væg, hvis lyden let transmitteres via gennemgående gulve eller lofter, flankerende vægge eller de tekniske installationer. Det er med andre ord helheden, der er afgørende for et tilfredsstillende resultat; svigter blot et enkelt led i kæden, ødelægges eller forringes det samlede resultat.

Kravene til samplingsdetaljer er derfor for det første tæthed, dvs at selve tilslutningen skal være tæt, for det andet at flanketransmissionen, dvs lydens mulighed for at blive transmitteret via flankerende bygningsdele, minimeres.

Tætte samlinger mellem tunge, massive konstruktioner som murværk og betonkonstruktioner opnås ved at sikre helt fyldte og fuldt udstøbte, velkomprimerede mørtelfuger. Ved montagebyggeri med betonelementer er det af afgørende betydning, at "knasfuger" (tørre samlinger uden mørtelfugning eller -udstøbning) tættes effektivt med fx. elastiske fugebånds-mellemlæg eller efterfugning med elastiske fugemasser.

Ved pladeopbyggede konstruktioner tættes fugerne ved efterfugning ved pladernes tilslutning, suppleret med mineraluldstopning bag træskelet eller filt bag stålskelet.

Dimensionering af gode lydisolerende konstruktioner må ofte omfatte de tilstødende bygningsdele. Det er således helt afgørende for et tilfredsstillende resultat, at man ved dobbeltkonstruktioner gennemfører princippet helt konsekvent, dels ved "overskæring" af flankerende vægge, dels ved afbrydelse af gennemgående gulve og lofter. Som hovedregel kan man regne med, at en flankerende beklædning eller bygningsdel altid skal afbrydes, medmindre dens lydisolerende evne er bedre end den adskillende bygningsdels.

Læs mere om den praktiske udformning af dobbeltkonstruktioner og samplingsdetaljer og om flanketransmission fx i SBI-anvisning nr. 166: Bygningsakustik, Statens Byggeforskningsinstitut, 1989, i SBI-anvisning nr. 172: Bygningers lydisolering, nye bygninger, og i SBI-anvisning nr. 173: Bygningers lydisolering, ældre bygninger, Statens Byggeforskningsinstitut, 1992.

LYDMÅLING

Ved projektering af bygningskonstruktioner, hvortil der stilles krav om lydmæssige kvaliteter, (og det vil sige yder- og indervægge, etageadskillelser, tagkonstruktioner, trapper, gulve, lofter, vinduer og døre i stort set alle former for bygninger: erhvervs-, institutions- og boligbyggeri), er det et stort problem, at tilfredsstillende lydforhold ikke kan sikres på forhånd ad beregningsmæssig vej. Bygningsakustiske beregninger må nødvendigvis baseres på stærkt forenklede og idealiserede forudsætninger og vil derfor altid være behæftet med meget betydelig usikkerhed. Og visse forhold, som kan være af helt afgørende betydning, fx flanketransmission, lydbroer og transmission gennem utætheder, afhænger af så mange uforudsigelige faktorer, at de ganske enkelt ikke kan behandles beregningsmæssigt. Ved projekteringen er de væsentligste arbejdsredskaber derfor grove overslagsberegninger, laboratoriemålinger af komponent-prototyper og - først og fremmest - erfaringer fra allerede udførte konstruktioner.

Den lydmæssige kvalitet af det endelige resultat lader sig derfor i realiteten først konstatere efter byggeriets afslutning ved kontrolmålinger i den færdige bygning.

Ved sædvanligt forekommende bygningsprojekter vil kvalitetssikringsprogrammet omfatte følgende typer af kontrolmålinger:

- * Måling af luftlydisolation
- * Måling af trinlydniveau
- * Måling af efterklangstid
- * Måling af installationsstøj
- * Måling af trafikstøjniveau

bl.a. til sikring og dokumentation af, at de byggeretlige krav til bygningers lydforhold er opfyldt. I Danmark fremgår disse krav af Bygningsreglement 1995, kapitel 9: Lydforhold. I bilag 4 til reglementet er anvist retningslinier for udførelse af bygningsakustiske målinger i henhold til de herom gældende danske standarder (DS), der i stor udstrækning er identiske med de internationale standarder (ISO).

2. Rumakustik

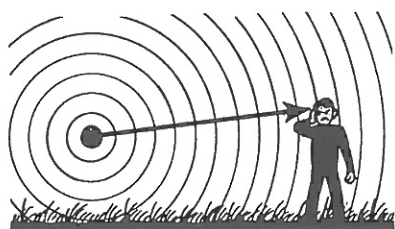
Efterklang

Efterklangstiden er et af de vigtigste begreber inden for rumakustikken, dvs den del af bygningsakustikken, der omhandler de lydmæssige forhold inden for det enkelte rum. Efterklangstiden er et mål for rummets "klangfylde", idet den udtrykker, hvor lang tid lyden er om at "klinge ud", så den ikke længere kan høres. Katedraler og store banegårdshaller er eksempler på rum, der sædvanligvis har en relativt lang efterklangstid, medens små rum som fx boliger og kontorer har en ganske kort efterklangstid.

Efterklangstiden afhænger af rummets geometri og af de omsluttende fladers lydabsorberende egenskaber. Da materials og konstruktioners lydabsorberende egenskaber (absorptionskoefficienten α) sædvanligvis er stærkt frekvensafhængige, er det samme tilfældet med efterklangstiden. Generelt kan efterklangstiden således ikke udtrykkes ved et enkelt tal, men må principielt udtrykkes ved et helt frekvensspektrum af efterklangstider. Alligevel udtrykkes et rums efterklangstid for simpelhedsskyld ofte ved en enkelt talværdi, nemlig efterklangstiden t_{500} [s] ved frekvensen $f = 500$ Hz.

I det følgende er givet en kortfattet fremstilling af, hvordan efterklangstiden defineres, og hvordan den kan bestemmes ved beregning.

Frit, sfærisk lydfelt



Betragtes en i det fri anbragt lydgiver, der til tidspunktet $t = 0$ starter med at afgive en konstant lydeffekt N , vil der i et punkt P i afstanden R fra lydgiveren være energitætheden $E = 0$ indtil tidspunktet $t = R/c$ (hvor c betegner bølgehastigheden). I dette øjeblik stiger energitætheden i punktet til en konstant værdi

$$E = N/(c \cdot 4\pi \cdot R^2) \quad (1)$$

(i tidsrummet Δt afgiver lydkilden energien $\Delta t \cdot N$, der befinder sig inden for en kugleskal af tykkelsen $\Delta t \cdot c$ og arealet $4\pi \cdot R^2$). Da energitætheden E i punktet P er proportional med kvadratet på det effektive lydtryk p_{eff} ($E = p_{\text{eff}}^2/(c^2 \cdot \rho_0)$), er lydtrykket p_{eff} i P altså omvendt proportional med afstanden R til lydgiveren.

Standses lydgiveren til tidspunktet $t = t_1$, vil energitætheden i punkt P forblive konstant E indtil tidspunktet $t = t_1 + R/c$ og derefter falde momentant til 0.

Et sådant lydfelt kaldes et *frit, sfærisk felt* og er altså karakteriseret ved en punktformig lydgiver, der som den eneste bidrager til energitætheden i ethvert punkt i det omgivende rum. Sådanne lydfelter er idealtilfælde, som ikke forekommer i virkeligheden, men med god tilnærmelse kan det frie, sfæriske felt opleves på helt vindstille dage i naturen, langt fra reflekterende genstande (fx huse, hegn og større træer). Ligeledes er der i "lyddøde rum" (specielt konstruerede lydum med næsten totalt absorberende omsluttende flader) tilnærmelsesvist et frit, sfærisk felt.

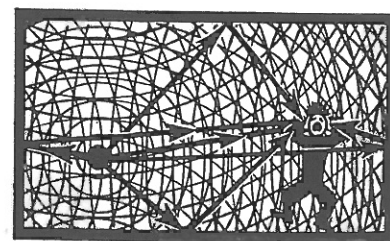
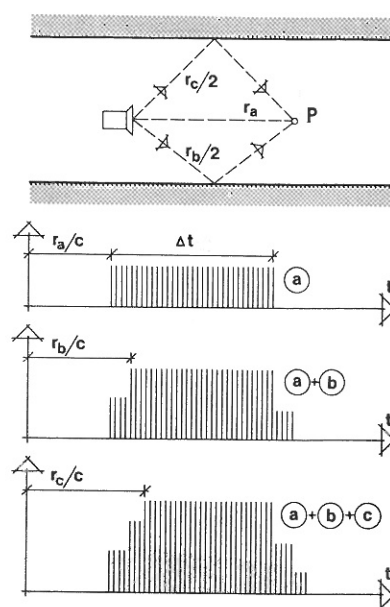
Diffust lydfelt

Anbringes der i nærheden af lydgiveren reflekterende skærme (fx to som vist på figuren), vil der til punktet P i afstanden r_a fra lydgiveren foruden den direkte lyd (a) komme to indirekte lyde (b) og (c), der skal tilbagelægge strækningerne r_b og r_c , der er længere end r_a , hvorfor de bidrager til energitætheden i P på senere tidspunkter end den direkte lyd. Ligeledes ophører deres bidrag til energitætheden senere end den direkte lyds efter lydgiverens standsning.

I et lukket rum udbreder lyden sig ikke uforstyrret som i det frie, sfæriske felt. Foruden den direkte lyd vil man i ethvert punkt af rummet modtage indirekte lyde, altså lyde, der er reflekterede fra de omsluttende flader, ikke blot en enkelt gang, men i princippet uendelig mange gange. Alt efter disse fladers beskaffenhed vil den direkte lyd eller de reflekterede lyde være dominerende, og på grund af, at der ved hver refleksion sker et vist energitab (absorptionskoefficienten α er i praksis > 0), vil bidraget til den samlede energitæthed være mindre, jo flere gange en lyd har været reflekteret, inden den når observationspunktet. Lydfeltets opbygning fra det øjeblik, lydgiveren startes, kan altså anskueliggøres ved en kurve, der når sit maximum gennem små spring af aftagende størrelse.

Er de flader, lyden rammer, således beskafne, at næsten hele den indfaldende lyd reflekteres (dvs flader med lav absorptionskoefficient), og tænker man sig, at lydkilden er et stort antal små lydgivere, der er jævnt fordelt over hele rummet, vil energitætheden overalt i rummet være præget af stor ensartethed og altså ikke som i det frie, sfæriske felt være afhængig af afstanden til lydgiveren. Et sådant lydfelt kaldes et *diffust lydfelt*.

Også diffuse lydfelter er idealtilfælde, som ikke forekommer i virkeligheden, men med god tilnærmelse kan diffuse lydfelter opleves i større rum med "hårde" (dvs stærkt reflekterende) gulve, vægge og lofter og med stærkt spredte lydgivere, fx store menneskeforsamlinger eller produktions- og transportmaskineri. Ligeledes er der i "klangrum" (specielt konstruerede lydum med næsten totalt reflekterende omsluttende flader og med jævnt fordelte lydgivere) tilnærmelsesvis et diffust lydfelt.



For at kunne bestemme, hvordan energitætheden E i et diffust lydfelt afhænger af lydkildens effekt N og af de omsluttende fladers absorptionsegenskaber (karakteriseret ved absorptionsarealet $A_\alpha = \sum \Delta A \cdot \alpha$ i det omhandlede frekvensområde), bestemmes indledningsvis indstrålingsintensiteten i , der er den energi, der pr. tidsenhed rammer en arealenhed af rummets begrænsningsflader.

Betragtes et arealelement ΔA af rummets begrænsningsflade, vil det fra ethvert volumenelement ΔV inden for en halvkulge med radius $c \cdot \Delta t$ i løbet af tidsrummet Δt modtage energien

$$\Delta Q = \Delta V \cdot E \cdot (\Delta A \cdot \sin \phi) / (4\pi \cdot r^2) \quad (2)$$

hvor ϕ er vinklen mellem ΔA 's plan og retningen fra ΔA til ΔV , og r er afstanden mellem ΔA og ΔV .

Som volumenelement ΔV betragtes et ringformet legeme med cirkelradius $r \cos \phi$ (omkreds $2\pi \cdot r \cos \phi$) og med tværsnitsarealet $dr \cdot d\phi \cdot r$, dvs

$$\Delta V = 2\pi \cdot r^2 \cdot \cos \phi \cdot dr \cdot d\phi \quad (3)$$

Indsættes (3) i (2), kan den samlede energi, der i løbet af tidsrummet Δt rammer ΔA fra alle volumenelementer, fås ved omordning og integration af ΔQ over halvkuglen, $Q = \oint \Delta Q$:

$$Q = E \cdot \Delta A \cdot \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\pi/2} \cos \phi \cdot \sin \phi \cdot d\phi \int_0^{c \cdot \Delta t} dr = 1/4 \cdot E \cdot \Delta A \cdot c \cdot \Delta t \quad (4)$$

Idet den samlede indstrålede energi i tidsrummet Δt på arealet ΔA er $Q = i \cdot \Delta t \cdot \Delta A$, fås indstrålingsintensiteten

$$i = 1/4 \cdot E \cdot c \quad (5)$$

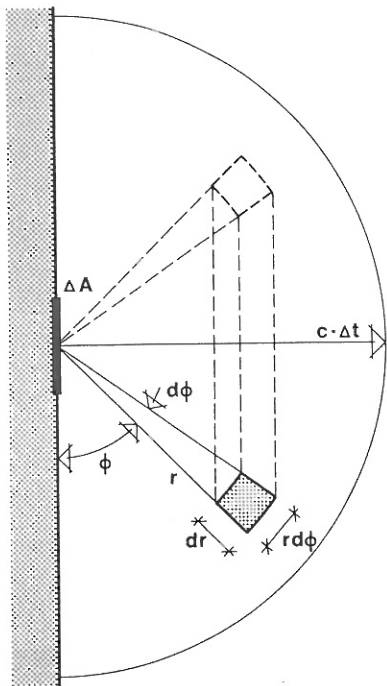
Et rum kaldes *lydhårdt*, når de omsluttende flader reflekterer så stor en del af den indfaldende lydenergi, at lydfeltet er diffust, dvs tilnærmelsesvist samme energitæthed overalt i rummet. Under stationære forhold er den effekt N , som lydgiveren afgiver, lig med den energi, som de omsluttende flader absorberer. Da effekten af den indfaldende lyd på at arealelement ΔA er lig med indstrålingsintensiteten i multipliceret med arealet, er den absorberede lyds effekt $\Delta A \cdot i \cdot \alpha$. Summeres over alle omsluttende flader, hvis samlede absorptionsareal er $\sum \Delta A \cdot \alpha = A_\alpha$, fås

$$N = i \cdot A_\alpha = 1/4 \cdot E \cdot c \cdot A_\alpha \quad (6)$$

Energitætheden i det diffuse lydfelt er altså

$$E = 4 \cdot N / (c \cdot A) \quad (7)$$

idet det samlede absorptionsareal A_α kort benævnes A [m^2 -sabin].



I et meget lydhårdt rum er talen næsten uforståelig; lyden kastes frem og tilbage mellem de omsluttende flader, således at refleksionerne af det ene ord bliver ved og kan høres, længe efter at det næste er begyndt.

Sammensatte lydfelter

I praksis er rum naturligvis hverken helt lyddøde eller helt lydhårde, og selv i sådanne lyddøde og lydhårde rum, som alene tjener til akustiske målinger, er energiforholdene ikke de nævnte ekstreme. Lyden vil altid bestå af både direkte og reflekterede lyde. Betragtes et lydfelt i et rum, hvor lydenergien alene frembringes af en enkelt "punktformig" lyd giver (eksempelvis en produktionshal med en enkelt, lydmæssigt stærkt dominerende maskine), vil lydfeltet i ethvert punkt af rummet være sammensat af en direkte lyd (hvor energitætheden som i et frit, sfærisk felt er afhængig af afstanden til lyd giveren) og reflekterede lyde (hvor energitætheden som i et diffust lydfelt er uafhængig af afstanden).

I et sådant *sammensat lydfelt* kan energitætheden i et punkt i afstanden R fra lyd giveren med god tilnærmelse bestemmes ved

$$E = N/(c \cdot 4\pi \cdot R^2) + 4 \cdot N \cdot (1 - \alpha_m)/c \cdot A \quad (8)$$

hvor $\alpha_m = \alpha_{\text{middel}}$ betegner det arealvægtede middeltal af de omsluttende fladers absorptionskoefficienter i det omhandlede frekvensområde. Faktoren $(1 - \alpha_m)$ i leddet med det indirekte bidrag er medtaget for at tage hensyn til, at al indirekte lyd er reflekteret mindst én gang.

Idet energitætheden $E = p_{\text{eff}}^2/(c^2 \cdot \rho_0)$, kan lydtrykniveauet L_p i afstanden R fra lyd giveren bestemmes:

$$L_p = 10 \cdot \log_{10}[(p_{\text{eff}}/20 \cdot 10^{-6})^2] = 10 \cdot \log_{10}[(E \cdot c^2 \cdot \rho_0)/(20^2 \cdot 10^{-12})] \quad (9)$$

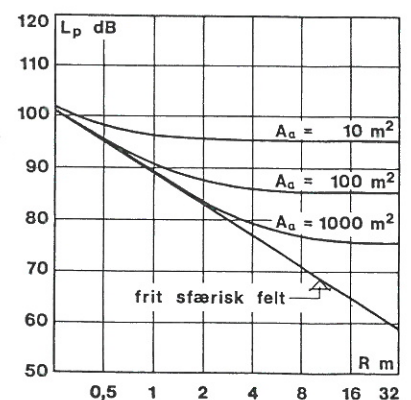
Indsættes (8) i (9), og sættes bølgehastigheden $c = 340$ m/s, og luftens ligevægtsdensitet $\rho_0 = 1,20$ kg/m³, fås med god tilnærmelse

$$L_p = L_N + 10 \cdot \log_{10}[1/(4\pi \cdot R^2) + 4 \cdot (1 - \alpha_m)/A] \quad (10)$$

hvor L_N er lydkildens effektniveau, der er defineret som $10 \cdot \log_{10}(N/N_0)$, hvor $N_0 = 10^{-12}$ [watt] er referenceværdien for effektniveau.

Som eksempel er på hosstående figur vist, hvordan lydtrykniveauet L_p varierer med afstanden R fra en punktformig lydkilde i et rum med 3 alternative værdier af absorptionsarealet A_a . Det ses, at lydtrykniveauet kan nedsættes ved at forøge A_a , dog aldrig mere end svarende den rette linie, der repræsenterer et frit sfærisk felt. For dette felt falder lydtrykniveauet L_p 6 dB, hver gang afstanden til lyd giveren fordobles.

Det skal understreges, at disse rent statistiske betragtninger om energi-



energiforholdene i et lukket rum er baseret på stærkt forenkede forudsætninger. Lyden absorberes ikke kontinuerligt som forudsat, men springvis, og lydfeltet er ikke diffust i den forstand, det er forudsat, men er sammensat af bølgebevægelser og altså retningsbestemt, ligesåvel som øret er det. Og endelig er der set bort fra, at også luften i sig selv dæmper lyden. Alligevel giver den *statistiske rumakustik* et værdifuldt grundlag for den praktiske løsning af bygningsakustiske problemer.

Lydfelters opståen og hendøen

Startes en lydgiver med effekten N i et rum med volumen V og omslutende flader med absorptionsarealet A i det omhandlede frekvensområde, vil energitætheden til et bestemt tidspunkt t - under forudsætning af diffust lydfelt - være bestemt af

$$V \cdot dE/dt = N - 1/4 \cdot E \cdot c \cdot A \quad (11)$$

(energitilvæksten er lig med den tilførte energi minus den absorberede energi). Ved integration fås med randbetingelsen $(E, t) = (0, 0)$

$$E = 4 \cdot N / (c \cdot A) \cdot [1 - e^{(-c \cdot A / (4 \cdot V) \cdot t)}] \quad (12)$$

For tiden $t \rightarrow \infty$ er $E \rightarrow E_0 = 4 \cdot N / (c \cdot A)$, dvs at energitætheden nærmer sig asymptotisk til værdien i den stationære tilstand.

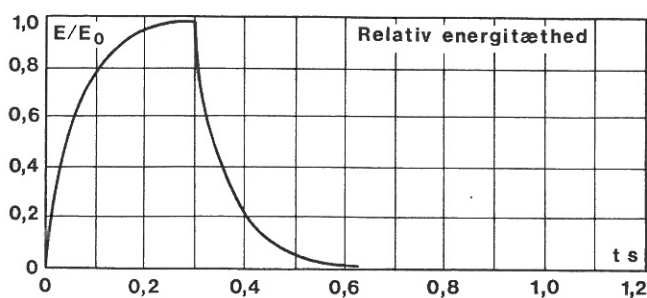
Standses lydgiveren, er energitætheden bestemt af

$$V \cdot dE/dt = - 1/4 \cdot E \cdot c \cdot A \quad (13)$$

Ved integration fås med randbetingelsen $(E, t) = (E_0, 0)$

$$E = 4 \cdot N / (c \cdot A) \cdot e^{(-c \cdot A / (4 \cdot V) \cdot t)} \quad (14)$$

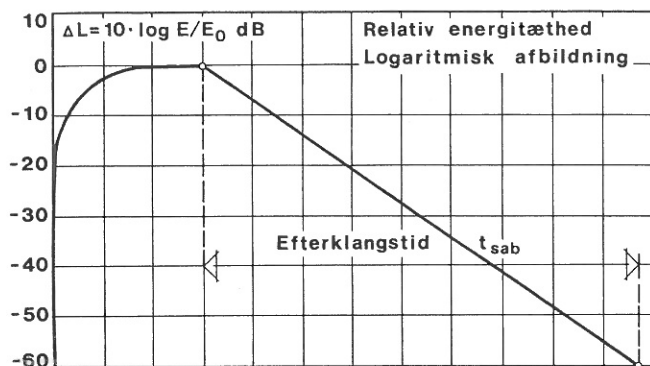
For tiden $t \rightarrow \infty$ er $E \rightarrow 0$, dvs at energitætheden går asymptotisk mod 0.



Lydfeltets opståen og hendøen er således bestemt af den samme eksponentialfunktion og tager altså principielt lige lang tid, således som det fremgår af figuren, der viser lydfeltet (karakteriseret ved den relative

energitæthed E/E_0) under opbygning og under hendøen efter 0.3 sekunder. Strengt taget varer begge dele dog uendelig lang tid, jvf eksponentialudtrykkene (12) og (14).

Således opfattes processen imidlertid ikke af det menneskelige øre: Lydfeltets opståen forekommer momentant, mens dets hendøen strækker sig over en vis tid. Det skyldes, at øret registrerer de relative trykændringer



og ikke de absolutte. Således vil en logaritmisk afbildning af lydtrykkets variation langt bedre illustrere ørets opfattelse af lydfeltets opståen og hendøen, som vist på figuren. Det interessante i rumakustisk henseende er den tid, lydfeltet er om at dø hen, altså eksempelvis hendøningstiden, defineret som den tid, der forløber, fra lyd giveren standser, til lydtrykket er faldet til tærskelværdien for den menneskelige hørelse.

Efterklangstid

Hendøningstiden er altså afhængig af lydtrykkets maksimalværdi og af ørets følsomhed (der er forskellig i de forskellige frekvensområder) og giver således ikke en entydig information om rummets lydmæssige egenskaber. Langt bedre i så henseende er den af amerikaneren *W.C. Sabine* definerede efterklangstid, som er den tid, lydtrykket er om at falde til en tusindedel af udgangsniveauet. Det svarer til et fald i lydtrykniveauet på 60 dB ($\Delta L_p = 10 \cdot \log_{10}(1000^2) = 60$ dB).

Reduceres lydtrykket til en tusindedel, reduceres energitætheden til en milliontedel. Efterklangstiden, ofte benævnt t_{sab} , kan derfor - under forudsætning af diffust lydfelt - bestemmes af (14) ved indsætning af $t = t_{sab}$ og sætte $E_{t,sab} = E_0 \cdot 10^{-6}$:

$$E_{t,sab} = E_0 \cdot e^{(-cA/(4 \cdot V) \cdot t_{sab})} = E_0 \cdot 10^{-6} \quad (15)$$

$$\text{hvoraf} \quad -cA/(4 \cdot V) t_{sab} = \ln(10^{-6}) \quad (16)$$

Heraf kan efterklangstiden bestemmes

$$t_{sab} = -\ln(10^{-6}) \cdot 4 \cdot V / (c \cdot A) = 6 \cdot 2.30 \cdot 4 \cdot V / (c \cdot A) = 55 \cdot V / (c \cdot A) \quad (17)$$

Indsættes bølgehastigheden $c = 340$ m/s i (17), fås

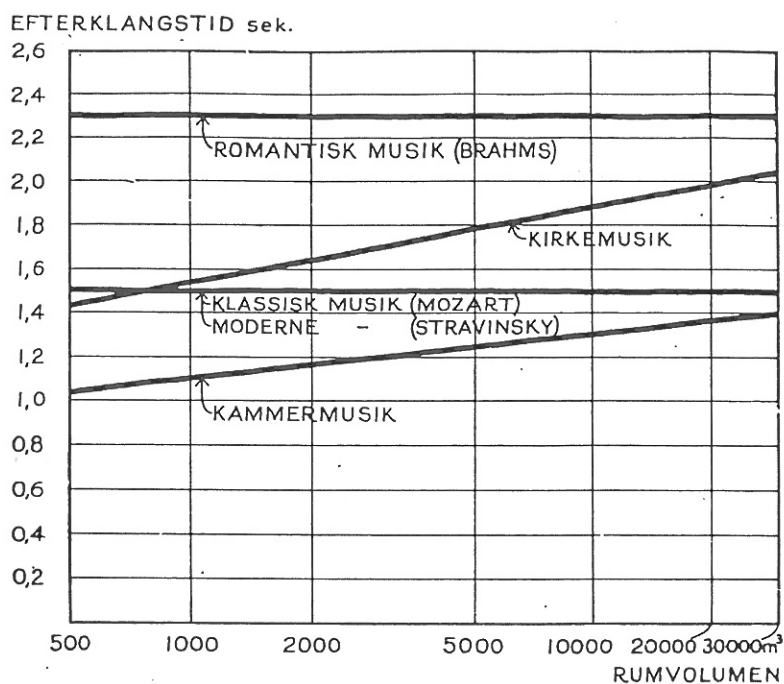
$$t_{sab} = 0.16 \cdot V / A \quad (18)$$

hvor t_{sab} er i [s], rummets volumen V i [m^3] og absorptionsarealet A er i [m^2], idet det bemærkes af (18) ikke som (17) er dimensionsløs.

Dette udtryk, Sabine's efterklangsformel, passer fortrinligt med udførte praktiske målinger, sålænge forudsætningerne er opfyldt i rimelig grad, hvilket er tilfældet ved langt de fleste almindeligt forekommende husbygningsopgaver som boliger, skoler, kontorer, butikker, produktionslokaler og mindre haller.

Det bemærkes, at Sabine's efterklangsformel i den viste form ikke tager hensyn til, at luften i rummet har en vis lyddæmpende virkning, der er afhængig af luftens fugtindhold.

I praksis bestemmes efterklangstiderne i frekvensintervaller, der ligger i det bygningsakustisk mest aktuelle frekvensområde, fra ca. 100 - 4000 Hz. Almindeligvis benyttes enten oktav-intervaller, karakteriseret ved centerfrekvenserne 125, 250, 500, 1000, 2000 og 4000 Hz, eller - for at få en mere nuanceret bestemmelse - intervaller á 1/3 oktav, karakteriseret ved de 16 standard-frekvenser 125, 160, 200, 250, ..., 4000 Hz.



Spørgsmålet om, hvad der er den gunstigste efterklangstid, afhænger først og fremmest af rummets brugsformål. Hvis rummet skal anvendes til opførelse af akustisk musik eller tilsvarende formål, som kræver en vis klangfylde, vil den optimale efterklangstid ligge fra omkring 1 til 2,5

sekunder, alt efter rummets størrelse og musikkens karakter. På figuren på side 7 er vist den "optimale" efterklangstid t_{500} for rum til forskellige former for akustisk musik. Ligeledes bør der tilstræbes størst mulig ensartethed i efterklangstiderne i de forskellige frekvensområder, så klangbilledet ikke forrykkes. (For elektronisk forstærket musik er forholdene helt anderledes; her skal der tilstræbes størst mulig dæmpning, dvs kort efterklangstid, så det elektronisk skabte klangbillede ikke forstyrres af rummets medvirken).

Hvis det primært er tydeligheden, der er afgørende for rummets brug, som for eksempel i undervisningslokaler, mødelokaler, radiostudier og små teatterum, skal efterklangstiden være passende lav, $\frac{1}{2}$ - 1 sekund, idet der også her bør tilstræbes størst mulig ensartethed i efterklangstiderne, så klangbilledet ikke forvrænges. Eksempelvis foreskriver Bygningsreglementet, at der i klasserum i undervisningsbyggeri skal være en middel-efterklangstid på maksimalt 0.9 sekund og en afvigelse fra middelværdien på maksimalt 0.2 sekund (BR 95, kapitel 9).

Da efterklangstiden er omvendt proportional med rummets absorptionsareal, benyttes krav til efterklangstiden også, bl.a. i BR 95, til indirekte at sikre en vis lydabsorption, for eksempel i daginstitutioner, idrætslokaler, værksteder og produktionslokaler, hvor det kan være nødvendigt, at der tilvejebringes fornøden støj dæmpning.

Et eksempel på beregning af efterklangstiden er vist på figuren. Det omhandler et klasseværelse, hvor valget står mellem to alternative typer loftkonstruktion, nedhængte gipslofter (a) eller mineraluldlofter (b). Af beregningen fremgår, at man ud fra rumakustiske hensyn skal foretrække gipsloftet, da mineraluldloftet giver for lang efterklangstid i det lave frekvensinterval (1.7 sekund ved 125 Hz).

	m ² /antal	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
		α	A	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A
1. Gulvbelægning	48	0,05	2,40	0,08	3,85	0,20	9,60	0,30	14,40	0,35	16,80	0,40	19,20
2. Vinduer	5	0,35	1,75	0,25	1,25	0,18	0,90	0,12	0,60	0,07	0,35	0,04	0,20
3. Skrivetavle	5	0,20	1,00	0,18	0,90	0,15	0,75	0,12	0,60	0,10	0,50	0,09	0,45
4. Pulte	25	0,10	2,50	0,20	5,00	0,30	7,50	0,35	8,75	0,40	10,00	0,40	10,00
5. Sum 1 - 4:			7,65		11,00		18,75		24,35		27,65		29,85
6. a. Vægge	80	0,01	0,80	0,02	1,60	0,02	1,60	0,02	1,60	0,03	2,40	0,03	2,40
7. Gipslofter, nedhængte	48	0,52	24,95	0,34	16,30	0,20	9,60	0,14	6,70	0,15	7,20	0,18	8,65
8. a. Sum 5 + 6 + 7			33,40		28,90		29,95		32,65		37,25		40,90
9. b. Vægge	88	0,01	0,90	0,02	1,75	0,02	1,75	0,02	1,75	0,03	2,65	0,03	2,65
10. Mineraluldlofter	48	0,15	7,20	0,60	28,80	0,70	33,60	0,74	35,50	0,76	36,50	0,83	39,85
11. b. Sum 5 + 9 + 10			15,75		41,55		54,10		61,60		66,80		72,35
12. Personer	25	0,17	4,25	0,36	9,00	0,47	11,75	0,52	13,00	0,50	12,50	0,46	11,50
13. Sum 8 + 12			37,65		37,90		41,70		45,65		49,75		52,40
14. t_a (tomt): $\frac{0,16 \cdot 154}{\text{Kol. 8}}$ sec			0,74		0,84		0,82		0,75		0,66		0,60
15. t_b (tomt): $\frac{0,16 \cdot 168}{\text{Kol. 11}}$ sec			1,71		0,65		0,50		0,44		0,40		0,37
16. t_a (fyldt): $\frac{0,16 \cdot 154}{\text{Kol. 13}}$ sec			0,65		0,65		0,59		0,54		0,51		0,48

I tabellen nedenfor er angivet absorptionskoefficienter for en række gængse materialer og konstruktioner. De virker som porøse absorbenter, membranabsorbenter, resonatorabsorbenter eller som kombinationer heraf, jvf side 4. Men ikke kun bygningsoverflader virker som absorbenter; også personer, møbler og andet inventar absorberer lyd. For sådanne *enkeltabsorbenter* er det ikke hensigtsmæssigt at arbejde med absorptionskoefficienter, men mere praktisk at tillægge dem et vist *ækvivalent absorptionsareal* [m^2]. Og endelig har også *rumluften* - afhængigt af den relative luftfugtighed - en vis absorptionsevne, som det kan være relevant at medregne. Det gøres ligeledes ved at tillægge luften et *ækvivalent absorptionsareal*, jvf tabellen (Kilde: Rumakustik, SBI-anvisning 137, 1984).

Materiale	Absorptionskoefficient ved frekvens, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Glat beton, umalet	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
Glat beton, malet	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Blank mur, tilbageliggende fuge af grov bakkegrusmørtel, fugedybde 12 mm, munkeforbandt	0,08	0,08	0,14	0,18	0,20	0,35
Blank mur, vandfaldsfuge af fin strandsandsmørtel, munkeforbandt	0,05	0,06	0,08	0,08	0,08	0,09
Blank mur, vandfaldsfuge af fin strandsandsmørtel, med kunstgummimaling (ca. 400 g/ m^2)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
55 mm mangehulsten med 33 huller (23 pct. perforation), 70 mm hulrum, 50 mm mineraluld	0,45	0,99	0,80	0,49	0,70	0,55
Glat puds på beton eller mur, umalet	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Let skillevæg, 2 x 13 mm gipsplader, stålskelet, hulrum, 50 mm mineraluld, malet overflade	0,15	0,10	0,06	0,04	0,04	0,05
Vindue med termorude opbygget af 3-4 mm glas	0,10	0,07	0,05	0,05	0,02	0,02
Massiv trædør	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Lakeret trægulv på strøer	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Parketgulv i asfalt på beton	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Linoleum eller vinyl klæbet på beton	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
5 mm nålefilt på beton	0,03	0,04	0,07	0,19	0,40	0,47
25 x 100 mm ru brædder, spalteafstand 5 mm, 50 mm hulrum med hessian og mineraluld	0,33	0,70	0,45	0,23	0,15	0,23
25 x 100 mm ru pløjede brædder, 50 mm hulrum med aluminiumkraftpapir og mineraluld	0,40	0,18	0,11	0,10	0,07	0,05
4 mm krydsfiner, 75 mm hulrum, 25 mm mineraluld	0,58	0,28	0,08	0,04	0,05	0,01
4 mm krydsfiner med Ø4 mm huller med centerafstand 10 mm, 75 mm hulrum, 25 mm mineraluld	0,21	0,44	0,65	0,64	0,54	0,47
25 mm mineraluldbatts (70 kg/ m^3) klæbet på beton	0,03	0,28	0,69	0,85	0,87	0,86
Bomuldsgardin (500 g/ m^2) draperet til ¾ areal og ophængt 130 mm fra væg	0,30	0,45	0,65	0,56	0,59	0,71
Gulvflade med stofbetrukne polstrede stole	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
Gulvflade med publikum, orkester og kor, inklusive smalle gange	0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85

Absorption i stole, bænke, personer og luft

Genstand	Ækvivalent absorptionsareal ved frekvens, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Træstol med sæde og ryg af finer	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,05
Kirkebænk med 50 mm stofbetrukne sæde- og ryghynder, pr. plads	0,10	0,25	0,42	0,53	0,55	0,57
Person på træstol	0,15	0,30	0,44	0,45	0,46	0,46
Luftabsorption (4 mV) pr. 1000 m ³ volumen ved:						
25 pct. relativ fugtighed	-	-	2,0	5,2	14,0	46,0
50 pct. relativ fugtighed	-	-	1,6	4,0	9,6	24,4

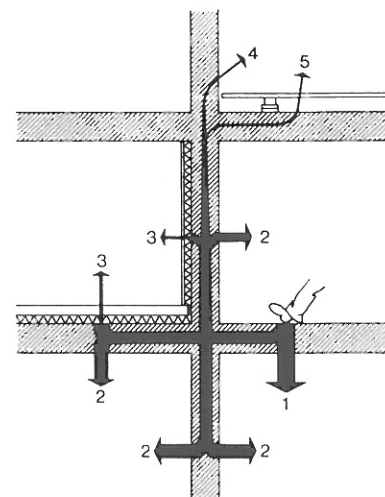
3. Lydisolering

Lydisoleringsteknikken er den del af *Bygningsakustikken*, der handler om at reducere opstået lyds forplantning til og fra det enkelte rum i bygningen. Afhængigt af, på hvilken måde lyden forplanter sig (transmitteres), skelnes mellem to former for lyd

- * luftlyd (airborne sound)
- * bygningslyd (impact sound)

Luftlyd (frembragt af fx tale, sang, musikinstrumenter, maskiner eller højttalere) forplanter sig gennem luften og sætter de omsluttende konstruktioner (vægge, døre, og etageadskillelser) i svingninger, således at der i rummet på den modsatte side frembringes og videre transmitteres luftlyd.

Bygningslyd forplanter sig gennem bygningens konstruktionsdele ved direkte, mekanisk påvirkning fra en lyd giver. Konstruktionerne sætter den omgivende luft i svingninger, der forplanter sig som luftlyd til det menneskelige øre. De hyppigst forekommende bygningslyde er *trinlyd*, der frembringes ved færdsel på gulvene, og *installationslyd*, der frembringes ved vands strømning gennem rør og ventiler og transmitteres på grund af disses mekaniske forbindelser med konstruktionerne. Begge former for bygningslyd kan give problemer i så at sige alle bygninger, hvor mennesker færdes, såsom boliger, kontorer, skoler og hoteller. Men også maskiner og højttalere, der er monteret i mekanisk fast forbindelse med konstruktionerne, eller fx slag- og boreværktøj kan i betydelig grad forårsage bygningslyd.

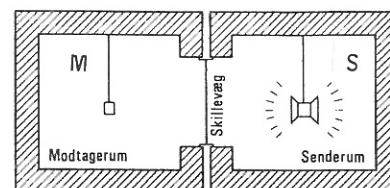


Luftlydisolation, reduktionstal

Som udtryk for en adskillende bygningsdels (fx en væg eller etageadskillelse) evne til begrænse luftlydtransmissionen gennem den defineres dens *reduktionstal* som

$$R = 10 \cdot \log_{10}(N_S/N_M) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

hvor N_S og N_M er henholdsvis den effekt, der rammer bygningsdelen på sendesiden, og den effekt, der afgives på modtagesiden, idet bygningsdelen tænkes monteret som adskillende konstruktion mellem to rum, et senderum (S) og et modtagerum (M) som vist på figuren.



Tænkes lydtransmissionen mellem de to rum udelukkende at ske gennem den adskillende bygningsdel, dvs det antages, at der ikke foregår nogen transmission gennem de omsluttende konstruktioner (bygningslyd) eller gennem eventuelle utætheder (luftlyd), vil forskellen i lydtrykniveauet L_S i senderummet og L_M i modtagerummet være

$$\Delta L = L_S - L_M = 10 \cdot \log_{10}(p_{eff,S}/p_{eff,M})^2 = 10 \cdot \log_{10}(E_S/E_M) \quad (2)$$

hvor E_S og E_M er energitæthederne i henholdsvis senderummet og modtagerummet.

I senderummet er den effekt N_S , der rammer den adskillende bygningsdel (hvis areal er S)

$$N_S = S \cdot i_S = S \cdot 1/4 \cdot E_S \cdot c \rightarrow E_S = 4 \cdot N_S / (S \cdot c) \quad (3)$$

hvor c er bølgehastigheden.

I modtagerummet er den adskillende bygningsdel den eneste lyd giver (effekten N_M), hvoraf fås energitætheden

$$E_M = 4 \cdot N_M / (c \cdot A_M) \quad (4)$$

hvor A_M er modtagerummets absorptionsareal.

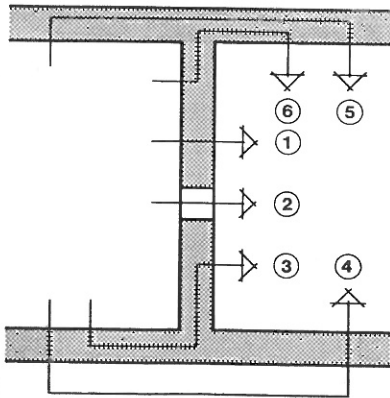
Ved indsætning af (3) og (4) i (2) fås

$$\Delta L = 10 \cdot \log_{10} \frac{4 \cdot N_S / (S \cdot c)}{4 \cdot N_M / (A_M \cdot c)} = 10 \cdot \log_{10}(N_S/N_M) - 10 \cdot \log_{10}(S/A_M) \quad (5)$$

Ved indsætning af (1) i (5) fås forskellen i lydtrykniveau

$$\Delta L = R - 10 \cdot \log_{10}(S/A_M) \quad (6)$$

Luftlydisolationen mellem de to rum er altså ikke alene afhængig af selve den adskillende bygningsdels lydisolerende egenskaber (udtrykt ved reduktionstallet R), men tillige af den adskillende bygningsdels areal S og modtagerummets lydabsorptionsegenskaber (udtrykt ved absorptionsarealet A_M).



Ved bestemmelsen af ΔL er det forudsat, at lydfelterne i begge rum er diffuse. Denne forudsætning er med god tilnærmelse opfyldt ved de fleste almindeligt forekommende bygninger. Derimod er forudsætningen om, at lyden alene transmitteres gennem den adskillende bygningsdel, ikke opfyldt i praktisk byggeri, idet der altid vil være en vis transmission gennem de tilstødende - flankerende - bygningsdele og eventuelt også gennem flankerende rum. Denne form for transmission kaldes *flanketransmission* og er anskueliggjort på figuren. Desuden vil lyden kunne transmitteres gennem eventuelle utætheder (huller, revner, spalter, utætte fuger etc), således at luftlydisolationen i praksis ikke er bestemt af (6), men af udtrykket

$$\Delta L = R - 10 \cdot \log_{10}(S/A_M) - C_1 - C_2 \quad (7)$$

hvor C_1 og C_2 er udtryk for tabet i luftlydisolation som følge af henholdsvis flanketransmission og transmission gennem utætheder. I nybyggeri bør disse tab ved hensigtsmæssige valg af konstruktioner og omhyggelig udformning af konstruktionsdetaljer kunne begrænses til 3 - 5 dB, men i meget byggeri kan der praksis måles tab på 10 - 15 dB.

For at skelne mellem det reduktionstal R , der kan bestemmes under laboratiormæssige forhold (tilnærmelsesvist ingen flanketransmission og transmission gennem utætheder), benævnes det reduktionstal, der forekommer i bygninger i praksis, R' , som kan bestemmes på grundlag af måling i den færdige bygning af udtrykket

$$R' = L_S - L_M + 10 \cdot \log_{10}(S/A_M) \quad (8)$$

hvor L_S og L_M er de målte værdier af lydtrykniveauet i henholdsvis senderummet og modtagerummet.

Forskellen mellem reduktionstallet R (der bestemmes ved laboratiormåling) og R' - det *tilsyneladende reduktionstal* - er altså netop $C_1 + C_2$ = tabet i luftlydisolation som følge af flanketransmission og transmission gennem utætheder, jvf (7) og (8).

Da hverken R eller R' kan bestemmes teoretisk, men må bestemmes ved måling i henholdsvis laboratorium og den færdige bygning, er det vanskeligt under projekteringen at udforme konstruktionerne, så det på forhånd sikres, at lydisolationen bliver tilfredsstillende i den færdige bygning. Det kan i realiteten kun ske på grundlag af erfaring.

Enkeltvæg sammenstøbt med dæk	Dæk med trægulv på strøer							
	Massiv betonplade			Betonhulplade		Betonribbeplade Masse/m ²		Letbetonplade
	120 mm	150 mm	185 mm	185 mm	220 mm	280 kg	320 kg	200 mm
168 mm bredsten	44/48	44/51	44/53	44/51	44/51			
1-sten	48/51	52/53	52/55	52/53	52/53	52/51	52/53	48/44
1½-sten	55/51	55/53	55/55	55/53	55/53	55/51	55/53	55/44
190 mm kalksandstensblokke	48/48	48/51	48/53	48/51	48/51			44/44
230 mm kalksandstensblokke	48/51	52/53	52/55	52/53	52/53	52/51	52/53	48/44
120 mm beton	48/51	48/53	48/53	48/51	48/51	48/48	48/51	
150 mm beton	48/51	52/53	52/55	52/53	52/53	52/51	52/53	
180 mm beton	52/51	52/53	52/55	52/53	52/53	52/51	52/53	
250 mm beton	55/51	55/53	55/55	55/53	55/53	55/51	55/53	

Tabel 34. Luftlydisolation R'_w dB for enkeltvægge og etageadskillelser sammenstøbt i etagekryds som vist i figurerne 56-62.

De angivne værdier forudsætter, at vægges og etageadskillelsers samlinger med øvrige omgivende bygningsdele er vurderet til samme luftlydisolation.

Værdier foran skråstregen gælder for vægge, værdier efter skråstregen for etageadskillelser.

R'_w er angivet ved lydklasse, se side 18.

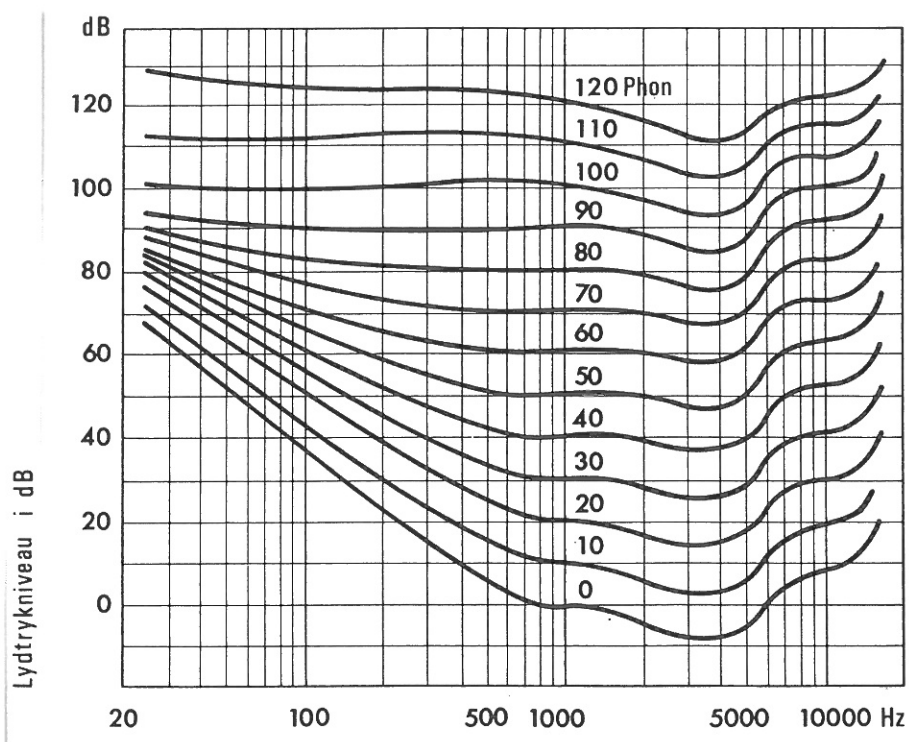
Et godt redskab til at vælge lydmæssigt egnede konstruktioner og udforme detaljerne hensigtsmæssigt er SBI-anvisning 172 *Bygningers lyd-isolering, nyere bygninger*, hvorfra tabellen ovenfor viser et eksempel.

Anvisningen, der bygger på resultater af målinger i færdige bygninger, indeholder en lang række eksempler på, hvordan forskellige bygningskonstruktioner kan kombineres, så man har et grundlag for at vurdere, om der i den færdige bygning kan forventes en tilstrækkelig lydisolations.

Den vægtede luftlydisolation R'_w

Luftlydisolationen er generelt stærkt afhængig af lydens frekvens, hvorfor reduktionstallet ikke kan udtrykkes ved et enkelt tal, men principielt må udtrykkes ved et helt frekvensspektrum af reduktionstal. Efter international praksis bestemmes de tilsyneladende reduktionstal R' i det bygningsakustisk mest aktuelle frekvensområde, karakteriseret ved de 16 standardfrekvenser med 1/3-oktav intervaller med centerfrekvenserne 100, 125, 160, 200,.....3150 Hz.

Det er dog ikke hensigtsmæssigt at skulle angive 16 tal for at karakterisere luftlydisolationen mellem to rum. Det simple aritmetiske middeltal mellem de 16 værdier er imidlertid ikke velegnet som udtryk for luftlydisolationen, sådan som det opleves af personer i bygningen. Det skyldes, at lydens *fysiske styrke*, fx udtrykt ved lydtrykniveauet, ikke svarer direkte til, hvordan det menneskelige øre opfatter lyden. Den *fysiologiske styrke* afhænger nemlig foruden af lydens fysiske styrke også af dens frekvens. Fx vil en 1000 Hz-tone opfattes som væsentlig kraftigere end en 100 Hz-tone med samme fysiske styrke.



Dette forhold er anskueliggjort på diagrammet ovenfor, der viser resultaterne af de af amerikanerne *H. Fletcher* og *W. A. Munson* udførte eksperimentelle undersøgelser af sammenhængen mellem lydens fysio-

logiske styrke og dens fysiske styrke. Forsøgene blev udført (o. 1930) på den måde, at forsøgspersonerne blev udsat for en række lyde (toner) af forskellig frekvens og styrke og hver især skulle oplyse, hvilken 1000 Hz-tone de styrkemæssigt ville sammenligne de enkelte toner med. Toner, der forekom forsøgspersonerne lige stærke, blev afsat som punkter i digrammets kurver, *isophoner*.

På grundlag af forsøgene defineres en tones *hørestyrke* som A phon, når den forekommer det menneskelige øre at være af samme styrke som en 1000 Hz-tone af den fysiske styrke L_p (lydtrykniveauet) = A dB.

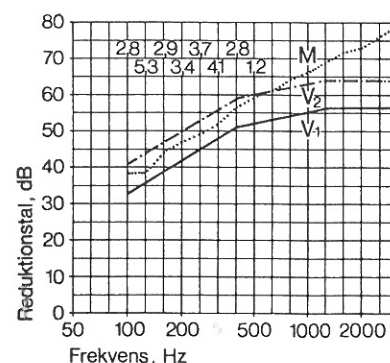
For det praktiske arbejde med lydisoleringsproblemer er disse informationer om lydens fysiologiske styrke af afgørende betydning, idet de fortæller, hvilke lyde der opfattes kraftigst og derfor vil genere mest. Af ørefølsomhedskurverne kan det direkte sluttet, at lydisolationen bør være væsentlig bedre ved de høje end ved de lave frekvenser.

Derfor må der tages hensyn til variationerne i ørefølsomheden, såfremt luftlydisolationen mellem to rum skal angives ved et enkelt tal. Efter international praksis (ISO 2186, part 1) kan det gøres ved at foretage en vægtning af det tilsyneladende reduktionstal R' på følgende måde:

For hver enkelt af de 16 standardfrekvenser bestemmes R' ved måling i den færdige bygning, jvf (8). Disse værdier benævnes "måleresultatet" (M) [dB] og afsættes som ordinat i et diagram med frekvensen som abscisse i logaritmisk målestok (100 - 3150 Hz). I samme diagram indtegnes en standardiseret vurderingskurve V_1 , der tilnærmelsesvist svarer til en ørefølsomhedskurve på ca. 40 phon, og som er defineret som tre rette liniestykker med hældningerne 9 dB/oktav, 3 dB/oktav og 0 dB/oktav som vist på figur 1 (SBI-anvisning 172). Vurderingskurven V_1 forskydes parallelt med ordinataksen til den højeste beliggenhed, for hvilken betingelsen, at summen af ugunstige afvigelser er ≤ 32.0 dB, er opfyldt. (Ved ugunstige afvigelser forstås, at vurderingskurvens værdi overstiger måleresultatet M ved den pågældende frekvens). Denne beliggenhed af vurderingskurven benævnes V_2 , og dens værdi ved frekvensen 500 Hz benævnes R'_w , *den vægtede luftlydisolation*.

De lovmæssige krav til luftlydisolationen i bygninger er herhjemme angivet i kapitel 9 i bygningsreglementet BR 95, hvor de er formuleret som krav om en vis mindste værdi af luftlydisolationen R'_w . Eksempelvis skal der i boligbyggeri, hoteller og tilsvarende være en luftlydisolation R'_w mellem boligenheder på mindst 52 dB horisontalt (dvs gennem vægge) og på mindst 53 dB vertikalt (dvs gennem etageadskillelser). For undervisningsbyggeri er de tilsvarende krav lavere (henholdsvis 48 dB og 51 dB), for lokaler til fx musik dog højere (60 dB).

Læs mere om massive konstruktioners og dobbeltkonstruktioners luft-



Figur 1. Bestemmelse af luftlydisolationen R'_w . Kurve M angiver »Måleresultat«, dvs. reduktionstallet R' som funktion af frekvensen, fortrinsvis med 1 decimal. Kurve V_1 er en standardiseret vurderingskurve med ordinatværdien 52 dB ved 500 Hz. Kurve V_2 er den forskydede vurderingskurve, hvor summen af ugunstige afvigelser netop ikke overstiger 32,0 dB. Kurvens ordinatværdi ved 500 Hz angiver luftlydisolationen R'_w , som i eksemplet er 60 dB.

lydisolation i notat *Bygningers lydforhold, en introduktion til bygningsakustikken* (FBO 1998), side 5 - 8.

Trinlydisolation

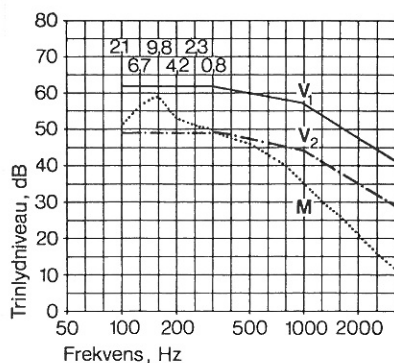
Bygningslyds forplantning i en bygnings konstruktioner er så kompliceret et problem, at det unddrager sig beregning til praktisk brug ved almindeligt forekommende husbygningsskonstruktioner. Problemet må derfor løses ved empirisk formulerede funktionskrav baseret på erfaringer fra praksis.

Som mål for en etageadskillelses trinlydisolation angives det lydtrykniveau, som frembringes i rummet under etageadskillelsen (modtagerummet), når konstruktionen sættes i svingninger af en standardiseret bankemaskine. Dennes nærmere udformning og måleproceduren iøvrigt er beskrevet i DS/ISO 140, del VII.

På tilsvarende måde som ved måling af luftlydisolation foretages målingen af det i modtagerummet frembragte lydtrykniveau L_M ved de 16 standardfrekvenser (100 - 3150 Hz). Da de således målte værdier er afhængige af modtagerummets lydabsorberende egenskaber, må der for hver enkelt måling foretages korrektion herfor, hvilket sker ved at beregne det *normaliserede trinlydniveau* af udtrykket

$$L'_n = L_M + 10 \cdot \log_{10}(A_M/10) \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

hvor A_M er modtagerummets absorptionsareal [m^2].



Figur 2. Bestemmelse af trinlydniveauet $L'_{n,w}$. Kurve M angiver »Måleresultat«, dvs. trinlydniveauet L'_n som funktion af frekvensen, fortrinsvis med 1 decimal. Kurve V_1 er den standardiserede vurderingskurve, der har ordinatværdien 60 dB ved 500 Hz, og kurve V_2 er den forskydte vurderingskurve, hvor summen af ugunstige afvigelser netop ikke overstiger 32,0 dB. Kurvens ordinatværdi ved 500 Hz angiver trinlydniveauet $L'_{n,w}$ som i eksemplet er 47 dB.

De 16 værdier af L'_n benævnes "måleresultatet" (M) [dB], og på tilsvarende måde som ved vurderingen af luftlydisolationen tages der hensyn til variationerne i ørefølsomheden ved at foretage en vægtning af L'_n på følgende måde:

Hvert enkelt måleresultat (beregnet efter (9)) afsættes som ordinat i et diagram med frekvensen som absцisse i logaritmisk målestok (100 - 3150 Hz). I samme diagram indtegnes en standardiseret vurderingskurve V_1 , der er defineret som tre rette liniestykker med hældningerne 0 dB/oktav, 3 dB/oktav og 9 dB/oktav som vist på figur 2 (SBI-anvisning 172). Vurderingskurven forskydes parallelt med ordinataksen til den laveste beliggenhed, for hvilken betingelsen, at summen af ugunstige afvigelser er $\leq 32,0$ dB, er opfyldt. (Ved ugunstige afvigelser forstås, at måleresultatet overstiger vurderingskurvens værdi ved den pågældende frekvens). Denne beliggenhed af vurderingskurven benævnes V_2 , og dens værdi ved frekvensen 500 Hz benævnes $L'_{n,w}$, *det normaliserede, vægtede trinlydniveau*.

De lovmæssige krav til trinlydisolationen i bygninger er herhjemme an-

givet i kapitel 9 i bygningsreglementet BR 95, hvor de er formuleret som krav om, at det normaliserede, vægtede trinlydniveau $L'_{n,w}$ ikke overstiger en vis værdi. Eksempelvis gælder for boligbyggeri, hoteller og tilsvarende, at trinlydniveauet i omliggende boligenheder og fælles opholdsrum ikke må overstige 58 dB. For undervisningsbyggeri er kravet lempeligere (maksimalt 63 dB), for lokaler til musik etc dog skærpet (53 dB).

I SBI-anvisning 172 er der givet en lang række eksempler på etageadskillelser, der erfaringsmæssigt giver tilfredsstillende trinlydisolation, herunder trinlyddæmpende gulvbelægninger i form af linoleum, vinyl eller tæppebelægninger. Hovedprincippet i trinlydmæssigt velfungerende etagedækkonstruktioner er "svømmende gulve" (af træ, beton eller asfalt), hvor mekanisk stive forbindelser mellem gulvbelægning og den øvrige konstruktion er reduceret til et minimum.

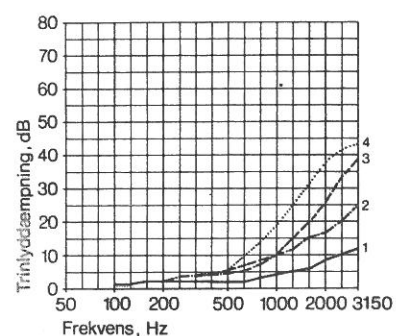
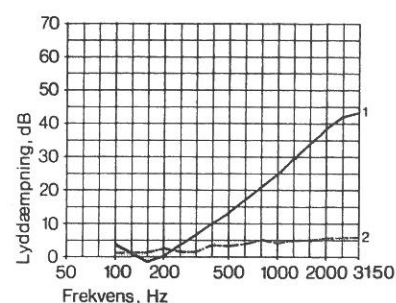
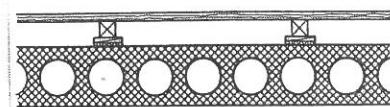
I figuren øverst til højre er vist et eksempel på en etageadskillelse af hule betonelementer ($h = 185$ mm) med en gulvbelægning i form af trægulv på strøer oplagt på bløde brikker. Kurverne i diagrammet er resultatet af en laboratiormåling, der viser, hvilken virkning gulvbelægningen har på trinlydisolationen og luftlydisolationen (i forhold til et dæk uden gulvbelægning) ved de forskellige frekvensbånd:

- kurve 1: *trinlyddæmpningen (= reduktionen af trinlydniveauet)*
 kurve 2: *luftlyddæmpningen (= forøgelsen af luftlydisolationen)*

I den nederste figur er vist den trinlyddæmpende virkning af forskellige typer gulvbelægninger:

1. *Linoleum*
2. *Linoleum + kork*
3. *Vinyl + skumplast eller filt*
4. *Tæppebelægning*

(Kilde: Bygningers lydisolering, nyere bygninger, SBI-anvisning 172, 1992).



Oversigt over lydteoretiske og bygningsakustiske grundbegreber

LYDTEORETISKE GRUNDBEGREBER

Lydtryk	p	= lufttrykkets øjeblikkelige afvigelse fra ligevægtstrykket	[Pa]
Effektivt lydtryk	p_{eff}	$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}$	[Pa]
Lydhastighed (bølgelængde)	c	$= \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T_k / M}$ ($c_{20} = 343$) For atmosfærisk luft ved stuetemperatur $c \sim 340$ m/s	[m/s]
Specifik, akustisk impedans	z	$= c \cdot \rho_0$ ($z_{20} = 412$)	[N·s/m³]
Frekvens	f	= antal svingningsperioder pr. tidsenhed	[Hz = s ⁻¹]
Standardfrekvenser		centerfrekvenserne for de internationalt standardise- rede 1/3-oktav frekvensbånd i rumakustikken: 125, 160, 200, 250 4000 Hz i lydisoleringsteknikken: 100, 125, 160, 200 3150 Hz	
Bølgelængde	λ	= c/f	[m]
Energitæthed	E	= lyden energi pr. volumenenhed ($= p_{\text{eff}}^2 / c^2 \cdot \rho_0 = p_{\text{eff}}^2 / c \cdot z$)	[J/m³]
Lydeffekt	N	= lyden energi pr. tidsenhed	[W]
Lydintensitet	I	= lyden energistrøm pr. arealenhed ($= E \cdot c$)	[W/m²]

LYDTEKNISKE DEFINITIONER

Lydtrykniveau	L_p	$= 10 \cdot \log p_{\text{eff}}^2 / p_0^2 = 20 \cdot \log p_{\text{eff}} / p_0$ ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa)	[dB]
Lydintensitetsniveau	L_I	$= 10 \cdot \log I / I_0$ ($I_0 = 10^{-12}$ W/m²)	[dB]
Lydeffektniveau	L_N	$= 10 \cdot \log N / N_0$ ($N_0 = 10^{-12}$ W)	[dB]
Absorptionskoefficient	α	= $\frac{\text{absorberet lyden energi}}{\text{indfaldende lyden energi}}$	[-]
Absorptionsareal	A_α	= $\Sigma S \cdot \alpha$	[m²-sabin]

RUMAKUSTISKE GRUNDBEGREBER

Frit, sfærisk lydfelt	E	$= \frac{N}{4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot c}$	[J/m³]
Diffust lydfelt	E	$= \frac{4 \cdot N}{c \cdot A_\alpha}$	[J/m³]
Sammensat lydfelt	E	$= \frac{N}{4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot c} + \frac{4 \cdot N \cdot (1 - \alpha_m)}{c \cdot A_\alpha}$	[J/m³]
Efterklangstid	t_{sab}	Definition: den tid, lydtrykniveau'et er om at falde 60 dB, efter at lydkilden er afbrudt	[s]
	t_{sab}	$= 55 \cdot \frac{V}{A_\alpha \cdot c} \approx \frac{0,16 \cdot V}{A_\alpha}$	[s]

LYDISOLATION

Reduktionstal	R	$= 10 \cdot \log N_S / N_M$	[dB]
Vedr. øvrige begreber se SBI-anv. 172		Ved måling i laboratorium: $R = L_S - L_M + 10 \cdot \log S / A_\alpha^M$ Ved måling i byggerier: $R' = L_S - L_M + 10 \cdot \log S / A_\alpha^M$	[dB]

Aalborg Universitet
Instituttet for Bygningsteknik
Marts 2002
ISSN 1395-7953 U0203